

19
NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. E. MASCART,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE GÉNÉRALE AU COLLÈGE DE FRANCE.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

SUCCESSION DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

—
1878



4372 PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, QUAI DES AUGUSTINS, 55.

TABLE DES MATIÈRES.

OPTIQUE.

	Pages
RECHERCHES D'ANALYSE SPECTRALE.....	1
DÉTERMINATION DES LONGUEURS D'ONDE.....	4
Recherches sur la dispersion.....	6
OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE.....	7
Visibilité des rayons ultra-violetés.....	7
Nouvel optomètre.....	8
Impression produite par les couleurs sur la rétine.....	9
THÉORIE DE LA LUMIÈRE.....	9
Direction des vibrations dans la lumière polarisée.....	9
Théorie de quelques phénomènes d'interférence.....	10
Sur la réflexion métallique.....	11
Application du spectroscope à l'observation des phénomènes d'interférences.....	12
NOUVEAU APPAREIL D'INTERFÉRENCE.....	14
Trompe des verres.....	16
Composition des couleurs.....	16
RÉFRACTION ET DISPERSION DES GAZ ET DES VAPEURS.....	17
Réfraction de l'eau comprimée et échauffement dû à la compression.....	21
RECHERCHES SUR LES MODIFICATIONS QU'ÉPROUVE LA LUMIÈRE PAR SUITE DU MOUVEMENT DE LA SOURCE LUMINEUSE ET DU MOUVEMENT DE L'OBSERVATEUR.....	23

ÉLECTRICITÉ.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.....	30
Modification du thermomètre électrique.....	30
Mesure des grandes différences de potentiel et loi des décharges disruptives.....	30
Mesure des potentiels en nombres absolus.....	32
Comparaison des machines électriques.....	33
Sur la théorie des électromètres.....	34
ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.....	35
Régulateur de courants électriques.....	35
Des machines magnéto-électriques.....	36
ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.....	37
Sur l'état électrique de l'air.....	37
Appareil inscripteur de l'électricité atmosphérique.....	40
Influence de l'orage sur la formation des brouillards.....	40
Influence de l'électricité sur l'évaporation.....	41

PUBLICATION.

Traité d'Électricité statique, 2 vol. gr. in-8°. Masson, 1876.

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. E. MASCART,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE GÉNÉRALE AU COLLÈGE DE FRANCE.

OPTIQUE.

Recherches d'analyse spectrale.

(*Revue des Sociétés savantes*, 1862. — *Journal l'Institut*, 27 mai 1863. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LVI, p. 138, et t. LVII, p. 789; 1863. — *Annales scientifiques de l'École Normale*, t. I, p. 219; 1864. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXIX, p. 337; 1869.)

Les différentes questions qui se rattachent à la composition des radiations émises par les sources de lumière ou à la dispersion des milieux réfringents ont acquis une grande importance depuis les belles recherches de MM. Bunsen et Kirchhoff. Il importe de remarquer à ce sujet que les rayons lumineux, perceptibles à l'œil et faciles à observer, sont en réalité compris entre des limites assez restreintes, car la longueur d'ondulation des rayons situés à l'extrémité rouge du spectre est à peine double de celle des rayons violets extrêmes; on peut dire encore, si l'on veut comparer les phénomènes lumineux aux vibrations sonores, que toutes les couleurs du spectre habituellement visibles sont renfermées dans l'intervalle d'une octave. Or les physiciens ont remarqué depuis longtemps que, de part et d'autre de la lumière visible dans un spectre, il existe des radiations dont l'effet lumineux est très-faible ou insensible. Les rayons moins réfringibles que le rouge ne se manifestent que par leur action calorifique, les rayons plus

réfrangibles que le violet se révèlent surtout par leur action sur les substances altérables à la lumière. On ne connaît pas encore de méthode d'observation précise pour l'étude des rayons calorifiques, mais j'ai essayé de montrer que l'étude du spectre ultra-violet peut être faite avec le même degré de précision que lorsqu'il s'agit de rayons lumineux. L'étendue extraordinaire du spectre que l'on obtient ainsi, surtout avec les lumières artificielles, permet d'agrandir singulièrement le champ des observations et d'écarter les limites entre lesquelles on pourra vérifier les lois de l'Optique.

Je me suis appliqué d'abord à étudier avec soin le spectre solaire ultra-violet. L'appareil qui m'a servi est la copie exacte du spectroscopé que l'on emploie pour l'observation du spectre lumineux, avec cette différence que les lentilles et les prismes réfringents sont en quartz ou en spath d'Islande, substances plus transparentes que le verre pour les rayons ultra-violets, et que l'oculaire de la lunette d'observation est remplacé par une petite plaque sensibilisée destinée à recevoir l'empreinte photographique du spectre et celle des fils du réticule. Cette sorte d'*oculaire photographique* donne des images très-petites et très-précises dont on peut obtenir des grandissements photographiques, ou que l'on reproduit par le dessin en les examinant au microscope; la trace des fils du réticule que porte chaque épreuve donne le moyen d'effectuer les mesures avec une grande précision. En suivant les précautions que j'ai indiquées, on arrive assez rapidement à obtenir des épreuves très-régulières et à mettre les images au point, bien que les phénomènes qu'il s'agit de reproduire soient généralement invisibles.

Le spectre solaire ultra-violet ainsi obtenu présente une étendue au moins égale à celle du spectre lumineux; il est sillonné d'un grand nombre de lignes inactives analogues aux raies obscures observées par Fraunhofer dans le spectre solaire lumineux. J'ai déterminé avec soin la position d'un grand nombre de ces raies inactives ou obscures et publié un dessin qui en renferme environ 700. Les meilleurs dessins que l'on avait encore de ce spectre ne contenaient pas 80 raies, et leurs positions n'avaient pas été déterminées exactement.

Les lumières artificielles se prêtent aisément à des recherches analogues. La volatilisation des sels alcalins dans la flamme d'un bec de gaz donne déjà, avec les spectroscopes ordinaires, un spectre ultra-violet assez étendu, formé de raies actives analogues aux raies brillantes lumineuses; mais, si l'on a recours à l'appareil indiqué précédemment et si l'on prend comme

sources de lumière une série d'étincelles électriques éclatant entre des fils de métal, on obtient des spectres ultra-violets d'une étendue extraordinaire. Avec certains métaux, comme l'argent et le cadmium, cette étendue peut être six ou sept fois plus grande que celle du spectre lumineux. J'ai publié, comme exemple et comme un type destiné à fournir des points de repère, le dessin des principales raies ultra-violettes de cadmium, en ayant soin de les définir exactement par leurs déviations dans un prisme de spath d'Islande.

On connaît les conséquences importantes que M. Kirchhoff a tirées de la correspondance qui existe entre les raies brillantes de certains métaux avec des raies obscures du spectre solaire lumineux. Il était aisé de prévoir qu'il doit exister des relations analogues dans le spectre solaire ultra-violet. J'y ai constaté, en effet, l'existence de raies obscures correspondant aux raies brillantes de quelques métaux, tels que le magnésium, le zinc et le fer. Pour ce dernier métal, en particulier, qui présente un si grand nombre de coïncidences dans le spectre lumineux, j'en ai constaté plus de cent nouvelles dans le spectre ultra-violet; comme elles correspondent à la plupart des raies intenses du Soleil, il en résulte que le spectre solaire et celui du métal, reproduits simultanément sur une même épreuve, semblent au premier abord complémentaires l'un de l'autre. D'autres métaux, comme le thallium et le cadmium, dont les raies brillantes ne correspondent pas à des raies obscures du spectre solaire, ne présentent pas non plus de coïncidences dans le spectre ultra-violet.

L'étude de ces rayons très-réfringibles peut conduire à des rapprochements d'un grand intérêt. On sait que, lorsqu'on élève progressivement la température d'une vapeur lumineuse, de nouvelles raies apparaissent successivement dans le spectre en même temps que les raies visibles à une température inférieure s'élargissent peu à peu, et qu'à une température suffisamment élevée le spectre tend à se couvrir entièrement de lumière. On peut comparer une telle source de lumière à un instrument de musique, un tuyau sonore par exemple, que l'on ferait vibrer à l'aide d'un courant d'air de plus en plus énergique. Pour une excitation modérée, l'instrument rend un son très-pur; à mesure que la vitesse du vent va en augmentant, le son primitif devient plus intense, et une série de sons nouveaux apparaissent successivement: ce sont des harmoniques, dont la loi de production est liée à la structure du corps sonore. On conçoit aisément que, si l'on connaissait la loi de succession des harmoniques d'un corps lumineux, on en pourrait déduire des conséquences très-importantes sur sa constitution molé-

culaire. Mais, si le corps lumineux, au lieu d'être comparable à un instrument simple, est déjà compliqué ou formé de plusieurs éléments vibrant séparément, il sera impossible de distinguer, dans l'ensemble souvent très-complexe des raies d'un spectre, celles qui doivent être groupées pour constituer une suite d'harmoniques. Il faudrait que les différentes raies harmoniques eussent un caractère commun qui permit de les distinguer; cette circonstance favorable me paraît exister dans certains cas.

Ainsi, j'ai constaté que les vapeurs de sodium à haute température produisent six groupes de raies doubles comme la raie jaune si connue, et que la distance des deux raies élémentaires qui constitue chaque groupe est analogue à celle des deux raies jaunes. Le spectre ultra-violet de ce métal présente une raie très-intense qui a le même caractère.

Le phénomène est encore plus remarquable pour le magnésium. Le spectre du magnésium possède trois raies vertes très-intenses qui correspondent exactement avec un groupe de trois raies obscures du spectre solaire, groupe que Fraunhofer a désigné par la lettre *b*. Or ce groupe de trois raies se retrouve deux fois avec la même forme dans le spectre ultra-violet, et les raies correspondent encore avec des raies obscures du Soleil; M. Cornu en a constaté récemment un quatrième groupe en dehors du spectre solaire. Pour le cas du magnésium surtout, la similitude de position des raies élémentaires dans chacun des groupes semble démontrer que l'on assiste à la reproduction d'un même phénomène en différents points de l'échelle spectrale, c'est-à-dire à une série d'harmoniques tenant à la constitution moléculaire du gaz lumineux. J'ai cherché à combiner de bien des façons les longueurs d'onde de ces différents groupes analogues sans trouver aucune relation qui mérite d'être signalée. On ne peut guère espérer de trouver la forme d'une pareille loi sans être guidé par des considérations théoriques.

Recherches sur la détermination des longueurs d'onde.

(*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LVIII, p. 1111, 1864; t. LXIV, p. 454, 1867. — *Annales scientifiques de l'École Normale*, t. IV, p. 7; 1867. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XIII, p. 186).

La détermination des longueurs d'onde des principales raies obscures du spectre solaire a été faite pour la première fois avec précision par Fraunhofer à l'aide de la méthode des réseaux, et les nombres qu'il a donnés ont été acceptés, jusque dans ces dernières années, par tous les physiciens. Il

m'a paru utile de vérifier ces résultats avec les moyens dont on dispose aujourd'hui, et surtout de les étendre à un certain nombre de rayons lumineux bien définis, tels que les raies brillantes des vapeurs métalliques, ainsi qu'aux rayons situés dans le spectre ultra-violet.

J'ai eu à ma disposition plusieurs réseaux tracés au diamant sur verre par M. Nobert de Barth, et j'ai eu l'occasion de faire, au sujet de ces appareils, quelques observations nouvelles. Le premier réseau dont je me suis servi a présenté des irrégularités bizarres, que l'on a retrouvées à un degré plus faible presque dans tous les autres. Outre les spectres de diffraction ordinaires, distribués symétriquement de part et d'autre de la normale à la lame qui porte les traits, on observe deux autres systèmes de spectres qui se reproduisent suivant une loi simple, mais qui sont dissymétriques et n'ont ni le même foyer ni la même déviation que les spectres réguliers. Ces irrégularités sont dues, comme l'a montré M. Cornu, aux inégalités périodiques que les imperfections de la machine à diviser établit entre les distances des traits du réseau. Il est nécessaire d'étudier ces irrégularités et d'éliminer l'influence fâcheuse qu'elles peuvent exercer sur l'exactitude des mesures.

J'ai observé aussi que, dans les spectres de diffraction par les réseaux, il se présente un *minimum de déviation* analogue au minimum de déviation des prismes réfringents. Cette propriété s'explique aisément par le calcul, et, au point de vue pratique, elle permet de rendre les mesures plus exactes et beaucoup plus rapides.

J'ai mesuré ainsi les longueurs d'onde des principales raies obscures du spectre solaire lumineux, des raies brillantes principales de l'hydrogène, du lithium, du calcium, du strontium, du magnésium, de l'argent, du zinc et du cadmium, des raies obscures du spectre solaire ultra-violet et des raies ultra-violettes du cadmium. Ces dernières déterminations ont présenté des difficultés spéciales, à cause du faible éclat des spectres de diffraction et à cause de l'absorption exercée par la lame de verre sur les rayons très-réfringibles. J'ai d'abord rapporté toutes ces mesures à la valeur donnée par Fraunhofer pour la raie D, et j'ai montré ensuite que le résultat de Fraunhofer relatif à cette raie devait être extrêmement voisin de la vérité. Une détermination plus précise de la valeur *absolue* de cette longueur d'onde exigerait la comparaison préalable et très-minutieuse d'une vis micrométrique au mètre étalon. Toutes ces expériences ont porté sur plus de cinquante raies, et les longueurs d'onde sont comprises entre $0^{\text{mm}},000768$ (raie rouge du potassium) et $0^{\text{mm}},0002217$ (raie extrême du cadmium), ce qui constitue environ deux octaves.

A peu près à la même époque, divers physiciens, notamment MM. Angström, Ditscheiner et Van der Willigen, faisaient des expériences analogues sur les raies lumineuses, et leurs résultats concordent d'une manière remarquable avec ceux que j'avais obtenus.

Le travail que je viens d'analyser brièvement a obtenu le prix Bordin à l'Académie des Sciences, et le Rapport de M. Fizeau se termine ainsi :

« En résumé, le Mémoire n° 1 est certainement le travail le plus approfondi et le plus satisfaisant qui ait été fait depuis Fraunhofer, relativement aux longueurs d'onde des divers rayons qui composent la lumière. De l'avis de tous vos Commissaires, ce travail révèle chez son auteur des connaissances théoriques distinguées et une grande habileté expérimentale. On pouvait souhaiter, sans doute, qu'il eût employé quelque autre méthode d'observation concurremment avec celle des réseaux. Cependant son Mémoire a fait faire à la question des progrès si considérables que votre Commission s'est trouvée unanime pour lui décerner le prix. »

Recherches sur la dispersion.

(Mémoires cités et *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XIV, p. 144.)

J'ai déterminé les indices de réfraction des principales raies obscures du spectre solaire lumineux et ultra-violet dans le quartz et dans le spath d'Islande ainsi que les indices de réfraction des raies ultra-violettes du cadmium dans le spath d'Islande. Les résultats relatifs au spectre lumineux sont très-voisins de ceux qu'avait obtenus Rudberg. J'ai remarqué à cette occasion que, pour le spath d'Islande, il y a un rapport constant entre le carré de l'indice de réfraction du rayon extraordinaire et l'indice de réfraction du rayon ordinaire. Cette relation n'a sans doute pas de signification théorique, mais les comparaisons de ce genre sont utiles comme contrôle des déterminations numériques; j'ai eu recours plusieurs fois à des relations analogues.

L'application des méthodes ordinaires à la mesure des indices de réfraction est sujette à plusieurs causes d'erreur qui tiennent, soit à l'imperfection du travail des prismes dans le voisinage des arêtes, soit au défaut de symétrie des faisceaux lumineux qui pénètrent dans la lunette d'observation. J'ai montré l'influence que ces diverses causes peuvent exercer sur la valeur des indices que l'on obtient, et indiqué les précautions nécessaires pour les éviter, dans la mesure de la réfraction et dans la détermination de

l'angle des prismes; j'ai publié en même temps une table de dispersion, pour les rayons lumineux et les rayons ultra-violet, des principaux verres employés par les opticiens. La considération des rayons ultra-violet me paraît devoir entrer en ligne de compte pour la construction des objectifs achromatiques destinés aux appareils de Photographie.

Ce dernier Mémoire a obtenu une mention très-honorable à l'Académie des Sciences (voir le Rapport de M. Fizeau; *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXIV, p. 453; 1867).

La connaissance des indices de réfraction et des longueurs d'onde pour des spectres aussi étendus que ceux que j'ai observés permet de soumettre à une vérification plus rigoureuse les différentes formules proposées pour exprimer la loi de dispersion dans les milieux réfringents. J'ai fait cette comparaison pour quelques formules à l'aide des nombres qui résultent de mes expériences relatives au spectre ordinaire du spath d'Islande. Il est à remarquer d'abord que les différences qui existent entre le calcul et l'observation varient d'une façon continue et régulière, quelle que soit la formule essayée; cette marche des résultats est une garantie de l'exactitude des valeurs des longueurs d'onde et des indices de réfraction. Il résulte ensuite de cette comparaison qu'aucune des formules généralement adoptées ne représente d'une manière suffisamment exacte le phénomène de la dispersion; la formule de Cauchy, bornée aux trois premiers termes, est encore la meilleure, en même temps qu'elle est la plus commode pour les calculs, mais l'expérience va plus loin, et il serait nécessaire d'introduire un quatrième terme, pour relier entre elles, d'une manière satisfaisante, les observations qui embrassent toute l'étendue du spectre observable.

Optique physiologique.

Sur la visibilité des rayons ultra-violet.

(*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXVIII, p. 402; 1869.)

M. Helmholtz avait observé déjà qu'en prenant des précautions convenables pour éliminer toute lumière étrangère, on peut voir directement dans la lumière solaire les rayons plus réfringibles que le violet et que tous ceux qui ont une action photographique appréciable sont perceptibles par l'œil, sur lequel ils produisent une impression de gris de lavande. J'ai constaté que les rayons ultra-violet fournis par les vapeurs métalliques jouissent de

la même propriété, quelque réfrangibles qu'ils soient, mais que, sous ce rapport, il existe des différences très-remarquables entre les différents yeux. Les vues ordinaires n'aperçoivent habituellement que le premier spectre ultra-violet, qui paraît avoir la couleur du gris de lavande. Certains yeux privilégiés voient ce premier spectre d'un violet pourpre très-intense, mais ils distinguent aisément des rayons encore plus réfrangibles dont la couleur, à mesure que la déviation augmente, s'affaiblit de plus en plus, passe par le gris de lavande et finit par une lucur qui n'a plus de teinte appréciable. M. Isambert, qui faisait avec moi ces expériences, apercevait des rayons qui appartiennent au huitième spectre ultra-violet, et dont la longueur d'onde peut être évaluée à $0^{\text{m}},000213$; ces rayons n'exerçaient plus d'action appréciable sur une plaque sensibilisée. Mais les yeux impressionnables par des rayons compris entre des limites si éloignées paraissent très-rares; je n'ai rencontré cette faculté que chez quelques personnes, toutes myopes à des degrés différents, ce qui n'est peut-être qu'une coïncidence fortuite.

Sur un nouvel optomètre destiné à faire connaître et à mesurer les vices de réfraction de l'œil.

(En commun avec M. Perrin. — *Annales d'Oculistique*, 1859.)

Nous avons cherché à rendre pratique la détermination des défauts de réfraction de l'œil, afin de permettre à chaque médecin d'indiquer la nature des verres propres à corriger ces défauts. L'instrument se compose d'un tube à l'une des extrémités duquel est un objet transparent et à l'autre extrémité une lentille convergente qui sert d'oculaire. Dans l'intérieur du tube est une lentille divergente d'un foyer plus court que la précédente, et que l'on peut déplacer depuis l'objet jusqu'à l'oculaire. L'image virtuelle de l'objet fournie par la lentille divergente se déplace avec cette lentille et peut être amenée en deçà ou au delà du foyer principal de l'oculaire; les rayons partis de l'objet acquièrent ainsi, en sortant de l'oculaire, tous les degrés de convergence ou de divergence qui conviennent aux divers états de réfraction de l'œil. L'instrument est gradué de façon que l'observateur, en mettant au point, indique sur une échelle le verre correcteur de sa vision.

En prenant pour objet une série de lignes parallèles que l'on peut amener par un tambour dans différents azimuts, on détermine de même l'orientation et le degré d'astigmatisme, ainsi que les longueurs focales des verres correc-

teurs. Enfin l'instrument sert de focomètre. Il permet de déterminer rapidement et avec une assez grande exactitude le foyer d'une lentille convergente dont la distance focale est comprise entre 0^m,06 et l'infini, et celui d'une lentille divergente dont la longueur focale varie de 0^m,14 à l'infini.

*Sur l'impression produite par les couleurs du spectre
en différents points de la rétine.*

(En commun avec M. Ferrin.)

Des expériences non publiées nous ont conduits à reconnaître que la perception des couleurs se modifie à mesure qu'on s'éloigne davantage de la vision centrale. Ces modifications, dont je ne puis indiquer que le sens général, se traduisent par plusieurs sortes de phénomènes : l'éclat s'affaiblit de plus en plus, les différentes couleurs se dégradent progressivement en changeant de teinte, de manière à produire vers la périphérie un gris plus ou moins vif, et la dégradation a lieu d'une manière inégale dans les différents azimuts; l'impression de la couleur est plus persistante dans un plan horizontal et se conserve d'une manière remarquable du côté de l'angle temporal.

Ces expériences sont très-pénibles, elles causent une grande fatigue de l'œil et produisent au bout de très-peu de temps un malaise tout à fait analogue au mal de mer; c'est là une des raisons qui nous ont empêché d'en poursuivre l'étude.

Théorie de la lumière.

Sur la direction des vibrations dans la lumière polarisée.

(Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. LXIII, p. 1005; 1866.)

En s'appuyant sur cette propriété importante démontrée par Fresnel, que les vibrations lumineuses sont transversales, on comprend aisément que, si un réseau est frappé normalement par de la lumière dont les vibrations sont parallèles aux traits, l'intensité de la lumière diffractée à une certaine distance de la normale sera plus grande que si les vibrations des rayons incidents étaient perpendiculaires aux traits; il est même facile de calculer, comme l'a fait M. Stokes, le rapport des intensités de la lumière diffractée qui provient de deux faisceaux incidents ainsi polarisés. Il suffirait, d'après cela, de faire tomber sur un réseau deux faisceaux polarisés à angle droit

et de constater quel est celui des deux qui donne le plus de lumière diffractée pour en conclure la direction des vibrations. L'expérience faite avec un des réseaux précédemment cités donne des résultats sensiblement conformes au calcul de M. Stokes et à l'hypothèse admise par Fresnel, que les vibrations sont perpendiculaires au plan de polarisation. Malheureusement l'expérience n'est pas concluante, parce qu'on néglige dans la théorie de tenir compte des vibrations longitudinales dont l'influence est inconnue, et que dans l'expérience le phénomène se complique des effets de polarisation par les fentes et les stries observés par M. Fizeau.

Sur la théorie de quelques phénomènes d'interférence.

(*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXIII, p. 373; 1871. — *Annales de Chimie et de Physique*, 4^e série, t. XXIII, p. 116.)

J'ai réuni dans ce Mémoire un assez grand nombre de phénomènes d'interférence, dont les uns me paraissent nouveaux, dont les autres ont été observés déjà, mais sans qu'on en ait donné une explication satisfaisante. Le caractère commun de ces phénomènes est que, si on les observe directement, l'œil doit être accommodé pour la vision éloignée, et que, si on les examine avec une lunette, les franges se produisent au foyer principal de l'objectif. En d'autres termes, l'interférence a lieu entre des faisceaux de rayons parallèles que l'on ramène au concours à l'aide d'une lentille convergente, comme cela a lieu pour ce qu'on appelle les phénomènes de polarisation chromatique dans la lumière convergente ou divergente. On peut obtenir ainsi, avec des lames à faces bien parallèles :

1^o Des anneaux de réflexion analogues aux anneaux colorés de Newton par réflexion ;

2^o Des anneaux de transmission analogues aux anneaux colorés par transmission ;

3^o Des anneaux que j'ai appelés de *réfraction* et qui sont analogues aux anneaux colorés des lames mixtes de Young.

La combinaison de deux lames à faces parallèles et d'égales épaisseurs donne lieu au phénomène des lames épaisses de Brewster; mais les franges rectilignes que l'on aperçoit habituellement ne sont qu'une très-petite partie des interférences complexes que l'on aperçoit avec de la lumière monochromatique. L'appareil interférentiel de M. Jamin et quelques autres dispositions analogues, telles que l'emploi de deux miroirs à angle droit, ne sont que des modifications du phénomène découvert par Brewster.

J'ai donné, je crois, le premier, le calcul exact des franges qui se produisent dans ces différentes circonstances et montré par des mesures qu'il y a accord complet entre la théorie et l'expérience. J'ai fait remarquer aussi que quelques-uns de ces phénomènes, en particulier les anneaux des lames mixtes, permettent de déterminer l'indice de réfraction d'une lame peu épaisse à faces parallèles, avec une précision qui me paraît bien supérieure à celle des méthodes généralement employées.

Sur la réflexion métallique.

(*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXVI, p. 866 ; 1873.)

Fresnel a démontré que le phénomène de la réflexion totale dans un prisme de verre ne se produit régulièrement que si le milieu situé au-dessous de la surface réfléchissante a une certaine épaisseur; cette intervention du milieu inférieur paraît être la cause du changement de phase qui s'établit entre deux rayons réfléchis dont l'un est polarisé dans le plan d'incidence et l'autre dans un plan perpendiculaire. Cauchy a développé sous une autre forme l'idée fondamentale de Fresnel, par la considération de vibrations évanescentes qui s'éteignent rapidement dans une épaisseur très-petite du deuxième milieu, mais qui laissent une trace permanente de leur influence en modifiant la phase des rayons réfléchis. La réflexion métallique présente beaucoup d'analogies avec la réflexion totale et possède aussi la propriété de produire une différence de phase variable avec l'angle d'incidence, ce qui n'a lieu pour la réflexion sur les substances transparentes que dans le voisinage de l'angle de polarisation.

Un moyen très-simple de déterminer l'influence de l'épaisseur de la couche réfléchissante est d'observer la réflexion de la lumière sur les lames de verre argentées. On peut ainsi faire varier à volonté l'épaisseur de la couche d'argent, et l'on constate que la différence de phase produite par la réflexion et le rapport des intensités des deux composantes principales se modifient d'une manière continue à mesure que l'épaisseur augmente, de manière à présenter tous les états intermédiaires entre la réflexion vitreuse et la réflexion métallique. Quand on a soin de laisser la couche d'argent intacte, telle qu'elle a été déposée avec les précautions indiquées par M. Martin, sans la soumettre à un poli artificiel, on évite les altérations profondes que subissent les corps au point de vue de leurs propriétés optiques par le changement de structure qu'entraîne le travail du polissage.

Cette cause d'erreur a été signalée, par la plupart des physiciens qui ont étudié la réflexion, comme une de celles qui nuisent le plus aux expériences et qu'il importe d'éliminer autant que possible.

La différence de marche était déterminée par un compensateur à teinte plate qui permettait de rétablir la polarisation rectiligne du rayon réfléchi et de l'éteindre ensuite complètement par un analyseur; dans ces conditions les mesures comportent une grande précision.

L'épaisseur de la lame d'argent était évaluée soit par la détermination directe du poids d'argent qui couvrait une surface déterminée, soit par un procédé dû à M. Fizeau, et qui consiste à compter le nombre des anneaux colorés produits par une parcelle d'iode qui transforme l'argent en iodure, de proche en proche, autour du point où elle a été déposée. Les deux méthodes donnent d'ailleurs des résultats concordants.

Une couche d'argent de moins de 5 millièmes de longueur d'onde d'épaisseur, c'est-à-dire tellement mince qu'on n'en soupçonne pas l'existence, produit déjà un changement de plusieurs degrés dans la valeur de l'incidence principale, c'est-à-dire de celle qui produit, d'après la définition de M. Jamin, une différence d'un quart de longueur d'onde entre les composantes principales du rayon réfléchi. L'épaisseur de la couche augmentant, la réflexion acquiert progressivement les caractères que lui donnerait une lame d'argent, mais une épaisseur d'un quart de longueur d'onde ne suffit pas encore pour que la réflexion métallique définitive soit atteinte.

*Sur l'application du spectroscope à l'observation des phénomènes
d'interférence.*

(*Journal de Physique théorique et appliquée*, t. I, p. 17 et p. 177; 1872,
et t. II, p. 153; 1873).

Ces articles ont un caractère didactique. Je me suis proposé d'indiquer des moyens très-simples pour répéter les expériences d'interférence et de diffraction, en utilisant le collimateur et la lunette d'un spectroscope ordinaire, instrument qui se trouve aujourd'hui dans toutes les mains.

J'y donne d'abord, par des considérations élémentaires très-simples, la théorie des phénomènes de diffraction que l'on obtient en interposant des lentilles sur le trajet des faisceaux lumineux. Les deux lunettes d'un spectroscope présentent ainsi de grandes ressources pour reproduire les phéno-

mènes de diffraction habituels dans les conditions les plus variées, et en particulier une classe de phénomènes dans lesquels quelques physiciens avaient cru voir une diffraction antérieure aux bords des écrans, due à des rayons rétrogrades.

L'appareil permet encore de réaliser les phénomènes d'interférence proprement dits, soit avec les miroirs de Fresnel dont les deux faces polies forment entre elles un angle plus petit ou plus grand que deux droits, soit avec un biprisme ordinaire ou un biprisme nouveau dont les deux moitiés sont accolées par leur bord le plus mince, soit enfin avec deux lames de verre d'égales épaisseurs inclinées dans un sens ou dans l'autre sur la direction des rayons lumineux.

Les phénomènes sont bien plus variés quand on fait intervenir le prisme du spectroscope. On peut ainsi observer :

1° Les spectres cannelés qui correspondent à la double réfraction du spath d'Islande ou au pouvoir rotatoire du quartz (méthode de MM. Fizeau et Foucault) ;

2° Les spectres à bandes d'interférence qui correspondent aux anneaux colorés de Newton par réflexion, ou aux anneaux de transmission, ainsi que les effets complexes dus à la superposition de plusieurs lames d'épaisseurs différentes ;

3° Les interférences des lames mixtes dans les conditions ordinaires où Young les a découvertes ;

4° Enfin les bandes d'interférence d'une espèce particulière qui ont été aperçues pour la première fois par Talbot.

Ce phénomène des bandes de Talbot se produit quand on établit un retard sur l'une des moitiés du faisceau de lumière qui traverse un spectroscope. La dissymétrie singulière qu'il présente a été expliquée pour la première fois par Airy, à l'aide de considérations mathématiques d'un ordre assez élevé ; j'en ai donné une explication élémentaire, et j'ai vérifié par des expériences la relation très-simple qui doit exister entre la largeur du faisceau, l'angle apparent des bandes et la longueur d'onde de la lumière pour que les interférences présentent le maximum de netteté.

Dans un troisième article j'indique comment, à l'aide des mêmes organes, avec une petite lame cristalline et une lame d'un quart d'onde, on peut répéter toutes les expériences relatives à l'interférence des rayons polarisés rectilignement et circulairement, expériences qui, entre les mains d'Arago et de Fresnel, ont servi à établir les principes de la constitution mécanique de la lumière.

Nouvel appareil d'interférence.

(*Journal de Physique théorique et appliquée*, t. III, p. 310; 1874.)

Depuis qu'Arago a proposé l'emploi des phénomènes d'interférence pour déterminer la différence de marche de deux faisceaux de lumière qui ont traversé des milieux différents ou qui ont été soumis à des modifications quelconques, on a imaginé et employé un grand nombre de dispositions qui permettaient d'améliorer de plus en plus l'application de cette méthode féconde de recherches.

Je me suis beaucoup servi d'un appareil fondé sur le phénomène des bandes de Talbot, qui me paraît présenter des ressources nombreuses et comporter une précision plus grande que les autres méthodes.

L'appareil comprend d'abord un collimateur à fente qui fournit des rayons parallèles et, à une certaine distance, les prismes et la lunette d'un spectroscope. A la sortie du collimateur, la lumière est divisée en deux faisceaux entre lesquels on établit un certain écart pour leur faire traverser des milieux différents ou les soumettre séparément à des modifications distinctes. Ces faisceaux sont ensuite ramenés au contact et forment un spectre dans la lunette. S'il existe entre eux une différence de marche du côté convenable et d'un ordre de grandeur déterminé, le spectre est sillonné de bandes d'interférence, et l'on peut avec un réticule pointer une région quelconque bien définie du spectre. Alors, si l'un des faisceaux éprouve une modification continue, comme celle qui résulte du changement de pression ou d'épaisseur du milieu qu'il traverse, la différence de marche est modifiée, et l'on voit passer sur le réticule, dans un sens ou dans l'autre, un certain nombre de franges que l'on peut compter avec une extrême précision. Comme on connaît la longueur d'onde de la lumière pointée par le réticule, on peut calculer le retard comme si l'on opérait avec une lumière homogène.

Pour que la méthode soit facilement applicable, il faut pouvoir écarter les deux faisceaux et établir entre eux une différence de marche initiale propre à donner dans le spectre des bandes d'une grande pureté. Cette dernière fonction est remplie en même temps par l'organe qui sert à écarter les deux faisceaux. Le moyen le plus simple est d'employer une sorte de compensateur imaginé par M. Fizeau et formé de deux lames de verre d'égale épaisseur collées à angle droit. Une bilame de cette forme est placée à la suite du collimateur pour écarter les deux faisceaux, tout en les maintenant parallèles entre eux. Plus loin, à une distance variable avec le phénomène qu'on veut étudier,

une deuxième lame, toute semblable et dirigée en sens contraire, ramène les faisceaux en contact avant leur entrée dans les prismes réfringents. Si les lames des compensateurs sont inégalement inclinées sur la lumière qui les traverse, elles établissent un retard que l'on peut, à l'aide d'une vis de rappel, porter du côté convenable et agrandir ou diminuer à volonté.

Dans ce cas, la distance des faisceaux ne peut être qu'une fraction de l'épaisseur des lames de verre. Il suffit, en général, qu'elle soit de quelques millimètres; mais, pour certaines expériences, il peut être utile de l'augmenter. On ne peut pas employer de lames très-épaisses, parcequ'on rencontre alors toutes les difficultés relatives à la trempe du verre. J'y suis parvenu en employant deux lames de verre identiques, taillées comme les parallélépipèdes de Fresnel, mais sous l'angle de 45 degrés. L'un des faisceaux éprouve deux réflexions sur la première lame et chemine ensuite parallèlement à sa direction primitive; l'autre faisceau rencontre plus loin la deuxième lame où il éprouve deux réflexions semblables et revient au contact avec le premier. Dans l'intervalle, les faisceaux sont écartés de toute la longueur des lames, et j'ai pu obtenir ainsi un écart de 90^{mm} entre les deux faisceaux, sans que les interférences cessassent de se produire avec la plus grande netteté. On pourrait, sans doute, augmenter encore la longueur des lames, s'il était nécessaire d'obtenir un écart plus grand entre les faisceaux interférents.

Enfin, pour écarter les faisceaux et jouer le rôle de compensateur, on peut employer encore deux plaques de spath d'Islande, entre lesquelles on interpose une lame d'une demi-onde, en ayant soin de polariser la lumière incidente et de l'analyser à la sortie. Cette disposition, employée déjà par M. Jamin dans les mêmes conditions que son appareil à lames épaisses, exige des spaths de grandes dimensions, puisque l'écart des faisceaux est environ le dixième de l'épaisseur du cristal; mais elle présente un avantage particulier, c'est que la lumière incidente est divisée par la double réfraction et que les deux faisceaux primitivement superposés sont encore superposés quand ils pénètrent dans les prismes. Dans ce cas, les franges ne sont pas de même nature que celles de Talbot, la différence de marche peut être quelconque, même nulle, et il n'y a pas à se préoccuper de rétrécir la largeur totale des faisceaux lumineux.

J'ai appliqué cet appareil interférentiel à l'étude de plusieurs phénomènes dont il sera question plus loin; un de mes élèves, M. Hurion, s'en est servi avec avantage dans des expériences récentes sur les dispersions anormales des dissolutions d'iode, d'aniline, de fuchsine et de permanganate de potasse (*Annales scientifiques de l'École Normale* (2^e série, t. VI, p. 367).

*Sur la trempe des verres.**(Journal de Physique théorique et appliquée, t. III, p. 139; 1874).*

Les verres employés pour la construction des appareils interférentiels et surtout pour la construction des grands objectifs doivent être autant que possible dépourvus de trempe, et c'est là une des difficultés les plus grandes que rencontre l'industrie. Pour vérifier la trempe des verres, on est obligé en général d'y tailler des faces à peu près parallèles dans différentes directions ou du moins d'en polir les surfaces. Mais, si l'on plonge un morceau de verre de forme quelconque dans un liquide de même réfraction contenu dans une cuve à faces parallèles, le verre devient presque invisible et, en l'observant au travers de la cuve avec un polariseur et un analyseur, on peut étudier dans toutes les directions la double réfraction due à la trempe. On met ainsi en évidence sans difficulté la trempe des glaces ordinaires, celle des larmes bataviques, etc., et ce procédé expéditif peut rendre des services dans l'industrie pour vérifier si les glaces ont reçu un recuit suffisant.

L'acide phénique convient admirablement avec le verre ordinaire; ce liquide devient d'un emploi général dans les cours publics pour la projection de différents phénomènes ou d'appareils dont la forme ne se prêterait pas directement à ce genre d'expériences.

*Sur la composition des couleurs.**(Bulletin de la Société de Physique, janvier-avril 1875, p. 7).*

Pour déterminer la teinte résultant d'un mélange de couleurs, il faut pouvoir superposer sur une même surface les différentes couleurs du spectre dans des proportions variables. On a employé pour cela plusieurs dispositions expérimentales et l'une des plus ingénieuses est la fente en forme de V, dont s'est servi M. Helmholtz. On obtient alors deux spectres superposés, dont les couleurs correspondantes chevauchent obliquement l'une sur l'autre. En un point de l'espace éclairé sont superposées deux couleurs déterminées, mais l'inconvénient de cet appareil consiste en ce que le mélange dont on veut apprécier la teinte n'occupe qu'une région très-restreinte.

J'indique une disposition qui permet d'obtenir sur un écran, avec une même source, trois spectres parallèles dont on peut faire varier à volonté le rapport des intensités et que l'on peut déplacer l'un sur l'autre d'une

manière quelconque, de façon à mélanger trois couleurs bien définies et dans des proportions déterminées. Il suffit de placer sur le porte-lumière un écran muni de trois fentes dont on fait varier les largeurs séparément avec des vis micrométriques. La lumière émise par la fente centrale est reçue sur un prisme à vision directe ; les fentes latérales sont couvertes chacune d'une lame légèrement prismatique qui dévie les faisceaux de part et d'autre, et on les reçoit sur deux prismes latéraux. Les spectres qui en proviennent sont ramenés par des miroirs ou une réflexion totale sur l'écran où se trouve déjà projeté le spectre du prisme à vision directe. Enfin les trois faisceaux sont assez peu écartés pour qu'on puisse les faire tomber sur une même lentille convergente destinée à produire des images pures. On voit aisément qu'en faisant tourner les miroirs et variant les largeurs des fentes on amènera en un même point de l'écran trois bandes de trois couleurs différentes, formant un mélange dans des proportions quelconques.

Sur la réfraction et la dispersion des gaz.

(*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXVIII, p. 617 et 679; 1874. — *Annales scientifiques de l'École Normale supérieure*, 2^e série, t. VI, p. 9; 1877. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXXVI, p. 321; 1878.)

L'étude de la réfraction de la lumière par les gaz présente un intérêt particulier à cause des considérations théoriques qui s'y rattachent. Newton a démontré, en effet, par des raisonnements fondés sur l'hypothèse de l'émission, que la puissance réfractive d'un corps, ou l'excès $n^2 - 1$ du carré de l'indice de réfraction sur l'unité, doit être proportionnelle à la densité du corps, c'est-à-dire à la masse de l'unité de volume. La loi des puissances réfractives s'est trouvée en défaut dans presque toutes les applications que l'on a essayé d'en faire aux solides et aux liquides; il y avait lieu d'admettre que les changements de densité que l'on pouvait obtenir dans ce cas, soit par des actions mécaniques, soit sous l'influence de la chaleur, produisaient dans la constitution physique de ces corps des changements qui ne permettaient pas d'appliquer la théorie de Newton. La loi était généralement admise pour les gaz; mais, comme elle ne peut pas être expliquée dans la doctrine des ondulations, au moins quant à présent, il était utile de voir jusqu'à quel point elle est conforme à l'expérience.

La réfraction des gaz étant très-faible dans les conditions où l'on peut opérer, la puissance réfractive $n^2 - 1$ est sensiblement double de la diffé-

rence $n - 1$, que l'on peut appeler simplement la réfraction. Si l'on admet les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, on peut donc représenter les variations de réfraction d'un gaz avec la température et la pression par la formule

$$\frac{(n - 1)(1 + \alpha t)}{H} = \frac{n_0 - 1}{760},$$

dans laquelle n est l'indice de réfraction à la température t et à la pression H , α le coefficient de dilatation des gaz et n_0 l'indice de réfraction à la température de zéro et sous la pression normale.

Depuis les mémorables travaux de M. Regnault sur la compressibilité et la dilatation des gaz, il était aisé de prévoir que cette relation ne devait être qu'approchée. J'ai d'abord essayé d'étudier la réfraction du gaz renfermé dans un prisme, suivant la méthode imaginée par Biot et Arago; mais, malgré quelques perfectionnements apportés à cette manière d'observer, je n'ai pas tardé à reconnaître que le phénomène des interférences comporte une précision plus grande. Je me suis servi de l'appareil interférentiel décrit plus haut, en intercalant entre les compensateurs deux tubes à gaz fermés par des lames de verre, lesquels étaient traversés séparément par les deux faisceaux de lumière.

Pour étudier l'influence de la pression, il suffit de produire des franges dans le spectre et de pointer le réticule de la lunette sur une raie déterminée. En faisant varier lentement la pression du gaz dans l'un des tubes, la différence de marche des deux faisceaux est modifiée d'une manière continue, et l'on compte le nombre de franges qui passent sur le réticule dans un sens ou dans l'autre. Connaissant la longueur d'onde du rayon sur lequel on opère, il est aisé d'en déduire la différence de marche et, par suite, le changement qu'a éprouvé l'indice de réfraction des gaz pour une variation de pression déterminée.

Il résulte de ces expériences que l'indice de réfraction d'un gaz à température constante est lié à la pression par une relation de la forme

$$n - 1 = AH(1 + BH),$$

dans laquelle A et B sont des coefficients qui dépendent de la nature du gaz.

D'autre part, on peut satisfaire d'une manière très-exacte aux expériences de M. Regnault sur la compressibilité des gaz jusqu'à 8 atmosphères, c'est-à-dire dans les limites où mes observations étaient renfermées, en représentant la densité du gaz par une formule analogue

$$d = A'H(1 + B'H),$$

de sorte que, si la réfraction du gaz est proportionnelle à la densité, les deux coefficients B et B' doivent être égaux.

Or on remarque d'abord que la réfraction et la densité varient de la même manière. Les coefficients B et B' sont négatifs pour l'hydrogène seul, et positifs pour tous les autres gaz. De plus, les coefficients B, déterminés par la réfraction, sont du même ordre de grandeur que les coefficients B', déduits des expériences de M. Regnault, sans être absolument égaux.

Les différences peuvent être attribuées en partie aux erreurs que comportent des observations aussi délicates, et surtout à cette circonstance que les deux systèmes d'expériences n'ont pu être effectuées à la même température. Il résulte de là qu'à température constante la réfraction $n - 1$ d'un gaz est à peu près proportionnelle à sa densité.

Il n'en est plus de même quand on fait varier la température. L'expérience indique cette fois que, pour une série de mesures faites entre les mêmes limites de pression, le produit $(n - 1)(1 + \alpha t)$, dans lequel on introduit le coefficient de dilatation relatif au gaz étudié, croît d'une manière continue à mesure que la température s'élève; pour obtenir un nombre constant, il est nécessaire de remplacer le facteur α par un nombre notablement plus grand que l'un ou l'autre des deux coefficients de dilatation du gaz.

Si la loi de Newton, ou toute autre équivalente, peut être considérée comme représentant d'une manière suffisante la variation de réfraction d'un gaz avec la pression, à température constante, elle devient, au contraire, manifestement inexacte lorsque le changement de densité est dû à une variation de température.

J'ai déterminé ainsi la réfraction de la plupart des gaz de la Chimie; les résultats auxquels je suis arrivé sont, en général, peu éloignés de ceux qu'avaient donnés Biot, Arago, et surtout Dulong; mais quelques-uns cependant présentent des différences notables.

La même méthode, permettant de mesurer l'indice de réfraction d'un gaz en un point quelconque du spectre, donne en même temps le moyen de déterminer la dispersion. On pourrait prendre successivement pour points de repère différentes raies dont les longueurs d'onde soient connues; mais on arrive au même résultat d'une manière plus simple en déterminant par une seule expérience les différences des indices de réfraction pour un certain nombre de raies; la mesure directe de l'un de ces indices permet alors de calculer les autres. Pour cela, on produit sur le spectre, éclairé dans toute son étendue et couvert de franges, un certain nombre de raies brillantes en faisant éclater en avant de la fente une série d'étincelles d'induction entre

deux fils métalliques. Il suffit alors de compter le nombre des franges qui existent entre les différentes raies à deux pressions différentes, pour en déduire les différences des indices de réfraction.

J'ai constaté ainsi que tous les gaz ordinaires ont une dispersion normale de même ordre que celle des corps solides ou liquides, et que certains d'entre eux, comme le protoxyde d'azote et le cyanogène, ont une dispersion supérieure à celle de l'eau.

J'ai étendu depuis ces recherches à plusieurs autres corps gazeux dans les conditions ordinaires, mais facilement liquéfiables, et aux vapeurs d'un grand nombre de liquides appartenant à la Chimie minérale ou à la Chimie organique. Dans ce cas, les expériences se simplifient beaucoup, parce qu'on n'a besoin que de déterminer le rapport de la réfraction du corps à celle de l'air dans les mêmes circonstances.

Mes premières expériences ayant démontré que la réfraction d'un gaz est proportionnelle à sa densité entre les limites de $\frac{1}{2}$ à 8 atmosphères, cette réfraction doit être proportionnelle à la pression tant que la loi de Mariotte est applicable, ce qui aura lieu généralement pour des pressions très-faibles. Il suffit donc de déterminer, pour le corps étudié et pour l'air, dans les mêmes conditions, le rapport du nombre de franges déplacées en un point du spectre à la variation de pression correspondante. Le quotient de ces deux quantités exprime le rapport de la réfraction du gaz à celle de l'air. On élimine ainsi les considérations relatives à la loi de compressibilité spéciale à chacun des gaz, la détermination exacte des températures et les corrections de toute nature qu'elles entraînent pour les différentes parties de l'appareil.

Toutefois, s'il s'agit d'un gaz facilement liquéfiable ou d'une vapeur, la réfraction relative ainsi évaluée croît, en général, à mesure que la pression moyenne augmente, de sorte que la réfraction fournit une méthode pour déterminer les écarts de la loi de Mariotte dans des cas où des expériences directes sur les changements de volume ou sur la mesure des densités présenteraient de grandes difficultés.

Cette influence de la pression moyenne se manifeste à partir de pressions très-faibles, même pour des corps habituellement gazeux, tels que les acides chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique, l'ammoniaque, l'acide sulfhydrique. On doit s'attendre à ce que les vapeurs présentent des variations encore plus grandes, surtout quand on les observe à une température inférieure à celle de l'ébullition normale; c'est ce que l'on constate, en particulier, pour le sulfure de carbone et l'acide cyanhydrique.

Il résulte de là que, si l'on veut comparer les réfractions des gaz et des vapeurs, on devra prendre les nombres qui correspondent aux plus faibles pressions, afin de se rapprocher des conditions limites dans lesquelles ces corps peuvent être considérés comme étant à l'état de gaz parfaits.

Enfin, l'expérience paraissant démontrer que la réduction à la température de zéro de la réfraction d'un gaz ne peut pas être effectuée par le coefficient de dilatation ordinaire, il serait nécessaire de déterminer un nouveau coefficient particulier à chaque corps. Pour éviter cette correction incertaine et difficile à évaluer, toutes les expériences ont été faites à une température voisine de 12°, et les résultats comparés chaque fois à celui que donnait l'air dans les mêmes conditions.

J'ai déjà publié les réfractions des vingt et un corps suivants :

Air.	Acide sulfhydrique.
Oxygène.	Chlore.
Azote.	Acide chlorhydrique.
Hydrogène.	Brome.
Oxyde de carbone.	Acide bromhydrique.
Acide carbonique.	Acide iodhydrique.
Protoxyde d'azote.	Cyanogène.
Bloxyde d'azote.	Acide cyanhydrique.
Ammoniaque.	Protochlorure de phosphore.
Eau.	Sulfure de carbone.
Acide sulfureux.	

Je publierai prochainement les résultats relatifs à un grand nombre de corps organiques et je discuterai, à ce sujet, les conséquences auxquelles conduit le calcul théorique de la réfraction des corps composés.

*Sur la réfraction de l'eau comprimée et l'échauffement dû
à la compression.*

(Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. LXXVIII, p. 801; 1874).

M. Jamin a montré que la loi des puissances réfractives permet de calculer d'une manière assez exacte l'indice de réfraction de l'eau comprimée, ce qui fournirait une méthode optique pour déterminer le coefficient de compressibilité des liquides. Comme ce phénomène est le seul, à ma con-

naissance, que l'on puisse invoquer en faveur de la loi de Newton, j'ai été conduit à reprendre cette expérience, en m'entourant de toutes les précautions indiquées par M. Jamin et en déterminant avec soin la température du liquide.

Les deux tubes de l'appareil interférentiel avaient 2^m de longueur et étaient complètement remplis d'eau. Un changement de pression de 1^m de mercure dans l'un des tubes donnait un déplacement d'environ 70 franges, de sorte que les mesures comportaient une grande précision.

J'ai constaté d'abord qu'à température constante le rapport du déplacement des franges à la variation de pression correspondante augmente un peu avec la pression, et diminue quand la température augmente. Il semble résulter de là que la compressibilité de l'eau varie plus vite que proportionnellement à la pression, comme on l'a déjà observé pour la plupart des liquides. D'autre part, l'influence de la température sur la réfraction est dans le sens prévu, puisque la compressibilité de l'eau diminue quand la température s'élève, mais les nombres que j'ai obtenus indiquaient une variation notablement plus rapide que celle qui résulte des expériences de M. Grassi.

Enfin, si l'on déduit de ces expériences le coefficient de compressibilité du liquide à la température de 15° par la loi des puissances réfractives, on trouve 0,0000518. En admettant, au contraire, la proportionnalité de la réfraction $n - 1$ à la densité, on obtient une autre valeur 0,0000453. Or, d'après les expériences très-précises de M. Grassi, le coefficient de compressibilité de l'eau à cette température est de 0,0000471, de sorte que la compressibilité réelle du liquide est intermédiaire entre les deux valeurs que l'on déduit du changement de vitesse de la lumière à l'aide de deux hypothèses différentes. La loi des puissances réfractives n'est même pas celle qui donne le nombre le plus voisin de la vérité; elle ne convient donc pas non plus au changement de réfraction de l'eau par la compression, et je ne crois pas qu'il existe aucun autre phénomène qui autorise à conserver désormais cette loi dans la Physique.

L'extrême délicatesse du procédé d'observation m'a permis de constater et de mesurer le dégagement de chaleur produit par la compression brusque de l'eau, ou plutôt, ce qui revient au même, l'abaissement de température qui résulte d'une brusque décompression. J'ai constaté ainsi qu'à la température de 16° l'indice de réfraction de l'eau diminue de 0,00000056 quand la pression éprouve une chute brusque de 4^m,38 de mercure. Comme on connaît la variation de l'indice de réfraction de l'eau avec la température,

on en déduit que le refroidissement dû à cette décompression était de $0^{\circ},0066$, ce qui donnerait $0^{\circ},0011$ pour la pression d'une atmosphère.

Ce dégagement de chaleur dû à la compression de l'eau a été prévu par sir W. Thomson comme une conséquence du principe de Carnot. M. Joule l'a vérifié déjà par expérience et constate que le sens du phénomène est renversé à une température inférieure à 4° , comme la théorie l'indiquait. Le calcul donnerait, pour la température à laquelle j'ai opéré, une variation de $0^{\circ},0009$, identique à celle que j'ai obtenue.

Cette expérience n'est qu'une confirmation de la théorie de la chaleur, confirmation déjà établie par les belles recherches de M. Joule, mais elle me paraît offrir un intérêt particulier, parce que la méthode y est nouvelle, le liquide comprimé faisant lui-même fonction de thermomètre; on élimine ainsi les difficultés que présente la détermination de variations de température aussi faibles.

Recherches sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur.

(*Annales scientifiques de l'École Normale supérieure*, 2^e série, t. I, p. 157, 1872, et t. III, p. 363; 1874).

D'après la théorie de Døppler, qui a été confirmée depuis par diverses expériences d'acoustique, la distance des ondes émises par une source de vibrations sonores ou lumineuses n'est pas la même, suivant que l'on considère la propagation dans le sens ou en sens contraire du mouvement de la source. Si donc il était possible d'opérer avec des appareils immobiles et d'observer la lumière provenant d'une source dont la vitesse de translation fût comparable à la vitesse de la lumière, la réfraction d'une parcelle lumière dans un prisme dépendrait, par une relation très-simple, des valeurs numériques et de l'angle de ces deux vitesses; mais ces conditions expérimentales ne sont pas réalisables, parce que la Terre se meut dans l'espace avec une vitesse qui est le $\frac{1}{10000}$ de la vitesse de la lumière et que l'observateur et les instruments participent nécessairement à cette translation.

Arago avait annoncé que si l'on observe deux étoiles tellement placées, que la Terre marche vers l'une et s'éloigne de l'autre en vertu de son mouvement de translation, la réfraction apparente que subit dans un prisme la lumière provenant de ces deux étoiles est exactement la même.

Ce résultat parut inconciliable avec la théorie de l'émission, et Fresnel essaya d'en rendre compte dans la théorie des ondulations, en admettant qu'un milieu réfringent en mouvement transporte avec lui une partie seulement de l'éther qu'il renferme. Il démontra ainsi que, dans un milieu en mouvement, la vitesse de propagation des ondes lumineuses dans le sens du mouvement du milieu est augmentée de la quantité $u \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$, expression dans laquelle u désigne la vitesse de transport du milieu, et n son indice de réfraction. Cette formule rend compte, en effet, de l'expérience négative d'Arago, le changement de réfraction qui a lieu en réalité étant compensé par le déplacement de la lunette d'observation; et M. Fizeau a montré directement que les ondes lumineuses sont entraînées en partie, conformément à la formule de Fresnel, par le mouvement du milieu dans lequel elles se propagent. J'indiquerai plus loin les modifications qu'il me paraît nécessaire d'apporter à la théorie de Fresnel.

On a essayé bien des expériences pour mettre en évidence, par des phénomènes optiques, le mouvement de translation de la Terre. M. Babinet a cru trouver une solution simple dans le phénomène de la diffraction par les réseaux; il a montré que le changement de direction apparente dû au déplacement de la lunette s'ajoute au changement produit par le mouvement du réseau, de sorte que la compensation n'a plus lieu comme dans l'expérience d'Arago. Le déplacement qu'il s'agit alors de mettre en évidence est plus grand que celui que recherchait Arago, et paraît devoir être observable sans de trop grandes difficultés. Cette expérience ne peut être réalisée, au moins avec les réseaux que l'on possède aujourd'hui, qu'en employant une source de lumière terrestre, ou la lumière solaire que l'on dirige par des réflexions convenables, soit dans le sens, soit en sens contraire du mouvement de la Terre : ce sont d'ailleurs les conditions qu'avait supposées M. Babinet.

Or j'ai répété l'expérience un grand nombre de fois aux époques les plus favorables, en employant la lumière solaire ou des lumières artificielles, et le résultat a été constamment négatif; et l'observation est assez précise pour permettre d'affirmer que, si le mouvement de la Terre produit un changement quelconque dans la direction apparente de la lumière diffractée, ce changement doit être très-petit par rapport à celui que donnerait le calcul de M. Babinet. En examinant alors la théorie de plus près, j'ai remarqué une cause d'erreur qui ne me paraît pas encore avoir été signalée. On admet implicitement dans le calcul que la lumière solaire réfléchie sur un miroir

se comporte exactement comme si elle provenait d'une source fixe située sur le prolongement du rayon réfléchi; mais cette conséquence n'est pas exacte si le miroir est mobile, comme cela a lieu pour les expériences faites sur la Terre. Le mouvement du miroir modifie la longueur d'onde de la lumière réfléchie, et tout se passe comme si le miroir était lui-même lumineux, ce qui constituerait alors une source mobile. L'emploi de la lumière solaire réfléchie par un miroir terrestre dans une direction quelconque est donc absolument équivalent à celui d'une source de lumière artificielle, et il est facile de démontrer que le changement de longueur d'onde dû au déplacement de la source produit une déviation du rayon diffracté qui compense exactement l'effet dû au déplacement simultané de l'appareil de mesure. Il en résulte alors que l'observation des phénomènes de diffraction avec la lumière solaire ou les lumières terrestres ne peut conduire qu'à des résultats négatifs au point de vue du mouvement de translation de la Terre, ce qui est conforme à l'expérience.

On ne peut substituer le miroir mobile à la source de lumière pour l'étude de la lumière réfléchie que si le mouvement du miroir est perpendiculaire aux rayons incidents, ce qui a lieu sensiblement pour la Terre et les planètes. Il en résulte cette autre conséquence que la lumière solaire réfléchie par une planète se comporte exactement comme si la planète émettait une lumière propre, identique à celle qu'émet le Soleil. Au contraire, le même raisonnement ne s'applique pas à la Lune et aux comètes, parce que la vitesse de ces astres ne peut plus être considérée comme perpendiculaire aux rayons qui leur viennent du Soleil.

Les conséquences de la théorie de Fresnel relatives à la réfraction produite par un prisme mobile m'ont paru mériter une étude expérimentale nouvelle. Considérons, en effet, deux sources de lumières synchrones, l'une mobile et l'autre fixe, par exemple la flamme jaune de l'alcool salé, et une étoile fixe dont le spectre possède les deux raies D qui indiquent la présence du sodium, et supposons que les rayons émis par ces deux sources se propagent en sens contraire du mouvement de translation de la Terre. Les périodes absolues de vibration sur les deux sources sont identiques, mais les longueurs d'onde de la lumière propagée sont différentes, à cause du mouvement de l'une d'elles; les déviations imprimées à ces deux faisceaux par un prisme réfringent fixe ou mobile doivent être différentes. Si, le prisme étant mobile, la déviation apparente est dans un cas égale à la déviation que l'on observerait avec un prisme fixe, cette déviation apparente doit en différer dans l'autre cas. Il en résulte que, si l'observation d'Arago est

exacte, on devra apercevoir un changement de déviation en opérant avec une source terrestre dont les rayons se propageront alternativement dans le sens et en sens contraire du mouvement de la Terre. Si, au contraire, cette dernière expérience donne un résultat négatif, il en résulte que l'expérience d'Arago, convenablement répétée, doit donner lieu à un changement de déviation.

Le changement de déviation qu'il s'agissait d'observer n'est qu'une petite fraction de la distance des deux raies D, et je voulais m'astreindre à n'employer qu'un seul prisme réfringent pour me rapprocher le plus possible du cas où la théorie se présente sous une forme simple. Il faut alors avoir recours à des prismes de grandes dimensions dont les faces soient taillées avec le plus grand soin, dont la matière soit très-homogène et dépourvue de trempe, et observer les rayons réfractés dans une direction très-voisine de la face de sortie du prisme.

Deux grands appareils ont été disposés à cet effet. L'un était installé à un poste fixe, dans une cave complètement close où les variations diurnes de température sont très-faibles. Le collimateur était dirigé vers l'ouest, de sorte qu'en faisant les observations à midi et à minuit, les rayons incidents pouvaient se propager dans deux directions opposées par rapport au mouvement de la Terre. L'autre appareil était monté sur une plaque tournante qui permettait de lui donner alternativement deux directions opposées. Les observations répétées un grand nombre de fois ont montré que le changement de déviation, s'il existe, est absolument inappréciable; d'après le degré de précision que comportaient les mesures, on peut même affirmer qu'un déplacement vingt fois plus faible que celui qu'indique la formule de Fresnel ne passerait pas inaperçu.

Ce résultat ne peut être expliqué que si l'on fait subir à la formule de Fresnel une petite modification. Des deux termes qui représentent, d'après Fresnel, la vitesse de transport des ondes dans un milieu en mouvement, l'un est proportionnel à la vitesse du milieu; ce terme est très-petit, il paraît exact et, quand même on le changerait un peu, la différence ne serait pas appréciable expérimentalement. Quant au terme principal, Fresnel dit simplement qu'il est le même que si le milieu était en repos; cela veut dire que ce terme dépend de la longueur d'onde absolue ou de la période de la lumière incidente; mais, si le milieu se meut, en marchant par exemple à l'encontre des ondes, la période de vibration de la *surface réfringente* est diminuée. On peut montrer, par quelques considérations très-plausibles, que la direction et la nature des ondes réfractées sont déterminées princi-

palement par la vibration de cette surface, et que, par suite, le premier terme de la formule de Fresnel doit dépendre de la période *apparente* de la lumière incidente.

Avec cette hypothèse les expériences s'expliquent sans aucune difficulté et à l'aide de calculs très-simples; mais il en résulte une autre conséquence importante : c'est que l'application des raisonnements de Fresnel à l'expérience d'Arago n'est plus permise et que l'on doit, dans ce cas, observer un petit changement de réfraction apparente, si l'on opère sur des rayons définis du spectre. Arago avait observé, il est vrai, avec un prisme achromatisé, et l'expérience devait de toute façon donner un résultat négatif, parce que le déplacement relatif de la source et de l'observateur altère la longueur d'onde ou la couleur de chacune des lumières élémentaires; par suite de la substitution d'une couleur à une autre, la déviation de la lumière blanche ne doit pas être modifiée.

La même compensation se retrouve dans la plupart des phénomènes d'Optique, dans tous ceux du moins auxquels je me suis adressé, quand on emploie une source de lumière artificielle mobile avec la Terre, ou la lumière du Soleil réfléchi dans une direction quelconque.

Ainsi, en apportant aux procédés d'observation généralement employés diverses modifications qu'il serait trop long d'énumérer ici, j'ai obtenu de très-belles franges dans le phénomène des lames mixtes, où l'interférence a lieu entre deux faisceaux dont l'un a cheminé dans l'air et l'autre dans un milieu réfringent, même lorsque la différence de marche atteignait 24000 longueurs d'onde. Dans ce cas, l'interférence apparente n'est pas altérée de $\frac{1}{200000}$ quand on éclaire l'appareil avec des rayons qui marchent dans le sens ou en sens contraire du mouvement de la Terre.

Pour observer les anneaux de Newton avec un grand degré de précision, j'ai étudié le choix de la lumière homogène qui convient le mieux. En éliminant, par exemple, une des deux radiations qu'émet une flamme colorée par la soude, j'ai obtenu plus de 50000 anneaux en faisant varier l'épaisseur de la couche d'air d'une manière continue, sans qu'il y eût aucune des périodes d'extinction observées par M. Fizeau. Avec quelques précautions particulières sur la marche géométrique des faisceaux de lumière, j'ai pu constater qu'en donnant aux rayons incidents une direction quelconque par rapport au mouvement de la Terre, la position des anneaux n'est pas altérée de $\frac{1}{200000}$.

On explique encore de la même manière les résultats négatifs observés par Hoek dans une expérience où l'interférence a lieu entre des faisceaux

qui ont traversé tous deux le même milieu réfringent, l'un dans le sens du mouvement de la Terre et l'autre en sens opposé. J'ai répété cette expérience sous une autre forme en produisant des franges très-larges à l'aide de deux faisceaux qui traversaient 90^{mm} d'un corps très-réfringent. Dans ce cas, le déplacement que peut produire le mouvement de la Terre est le même que si l'un des faisceaux avait un retard de plus de 100 000 longueurs d'onde. La formule de Fresnel indiquerait un déplacement de plusieurs franges, tandis qu'on peut affirmer qu'il n'atteint pas $\frac{1}{15}$ de frange.

Enfin, j'ai montré que le mouvement de la Terre n'a aucune influence sur la double réfraction du spath d'Islande. Pour rendre cette conclusion rigoureuse, il était nécessaire de produire des franges correspondant à une différence de marche beaucoup plus grande que celle que l'on observe habituellement dans ce genre de phénomènes. Le retard entre les deux rayons ordinaire et extraordinaire a été porté jusqu'à 50 000 et même, dans une expérience, jusqu'à 104 000 longueurs d'onde, sans qu'il y eût une altération de $\frac{1}{1000000}$ dans la position des franges.

Il en est de même pour la double réfraction circulaire que possède le quartz dans une direction parallèle à l'axe de cristallisation, où la différence de marche qui s'établit entre les deux rayons polarisés circulairement a pour effet de faire tourner le plan de polarisation. J'ai observé ce phénomène par une méthode qui permet de mettre en évidence un changement de $\frac{1}{4}$ de degré dans la rotation, quand celle-ci est déjà de 15 circonférences. J'ai déterminé, comme exemples, le pouvoir rotatoire du quartz pour la lumière jaune de la soude et pour la raie verte du thallium. Quant à l'influence de la Terre, elle a été encore inappréciable, tandis que l'application de la formule de Fresnel aurait donné un résultat de beaucoup supérieur aux erreurs possibles de l'observation.

Ces deux dernières expériences me paraissent présenter un intérêt particulier. Si l'on veut expliquer le changement de vitesse des ondes lumineuses dans un milieu en mouvement par le transport partiel de l'éther, comme l'a fait Fresnel, on rencontre d'abord cette difficulté que dans les milieux réfringents, et par conséquent dispersifs, la fraction d'éther transporté serait une fonction de la longueur d'onde de la lumière; mais, pour une même source de lumière, l'onde ordinaire et l'onde extraordinaire du spath d'Islande devraient éprouver le même accroissement de vitesse, et les deux rayons polarisés circulairement dans le quartz seraient dans le même cas. La contradiction disparaît si l'on applique la formule de Fresnel, sans se préoccuper des raisonnements qui ont servi à l'établir, aux deux ondes du

spath séparément, ainsi qu'aux deux vibrations circulaires du quartz. Il y a là un point qui mérite d'attirer l'attention des mathématiciens.

La conclusion générale de ce travail est donc que le mouvement de translation de la Terre n'a aucune influence appréciable sur les phénomènes d'Optique produits avec une source de lumière terrestre ou avec la lumière du Soleil, que ces phénomènes ne nous donnent pas le moyen d'apprécier le mouvement *absolu* d'un corps et que les mouvements *relatifs* sont les seuls que nous puissions atteindre.

[Une partie des résultats que je viens de rappeler était renfermée dans le Mémoire présenté à l'Académie des Sciences en réponse au programme proposé en 1870 pour le grand prix des Sciences mathématiques. Le travail n'étant pas terminé, l'Académie m'a accordé un encouragement en laissant la question pour le concours de 1872, et le Mémoire complet a été couronné par l'Académie (voir le Rapport de M. Fizeau, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXV, p. 1297; 1872, et t. LXXIX, p. 1531; 1874)].

ÉLECTRICITÉ.

Électricité statique.

*Sur une modification du thermomètre électrique.**(Journal de Physique théorique et appliquée, t. II, p. 313; 1873).*

Le tambour à levier, imaginé par M. Marey, permet de tracer la courbe continue des variations de pression qui se manifestent dans un appareil, même quand ces variations sont extrêmement faibles. J'ai eu l'idée d'appliquer cet appareil à la mesure de la dilatation produite dans le thermomètre électrique de M. Riess par les décharges des batteries. L'avantage de cette disposition consiste en ce que, au lieu d'avoir à observer le déplacement maximum d'un index de liquide qui est projeté brusquement au moment de la décharge, on obtient un tracé graphique de la pression à tous les instants de l'expérience. On constate ainsi que l'échauffement de l'air n'est pas instantané et qu'il faut un temps appréciable pour que la chaleur se communique de la spirale métallique au milieu ambiant. La courbe des pressions s'abaisse ensuite lentement, ce qui correspond au refroidissement par rayonnement, et cette courbe permet de tracer graphiquement ou de calculer la pression maximum que l'on aurait atteinte, si la spirale et la masse d'air s'étaient mises instantanément en équilibre de température.

Dans la plupart des cas, on n'a besoin de connaître les pressions qu'en valeurs relatives; il suffit alors de comparer les ordonnées de ces différentes courbes pour vérifier les lois du dégagement de la chaleur par les décharges électriques, les courants continus, les courants alternatifs, etc. Si l'on voulait obtenir des nombres absolus, il suffirait d'évaluer la masse de l'air et de graduer par un manomètre les indications du tambour à levier.

*Sur la mesure des grandes différences de potentiel et sur la loi des décharges disruptives à de grandes distances.**(Traité d'Électricité, t. II, p. 87).*

Les batteries ordinaires ne permettent pas d'obtenir de grandes distances explosives, parce qu'elles se brisent ou se déchargent spontanément par des étincelles qui longent la surface du verre, lorsque la charge électrique est

trop grande; il devient alors impossible d'évaluer les charges ou la différence de potentiel des armatures par la bouteille de Lane. D'autre part, tout appareil de mesure basé sur l'équilibre électrique cesse de fonctionner d'une manière régulière quand les conducteurs fournissent des étincelles fréquentes. Dans ce cas, on peut employer une batterie de bouteilles de Leyde disposées en cascade, qui permettent d'équilibrer, par une somme de différences de potentiel plus faibles, une différence de potentiel trop grande pour être évaluée directement.

Pour cela, une série de six bouteilles réunies en cascade sont disposées de telle façon que les deux armatures de chacune d'elles communiquent avec deux boules métalliques situées à la même distance. Quand les armatures extrêmes de la batterie sont réunies à deux conducteurs électrisés, la différence des potentiels extrêmes est égale à la somme des différences relatives à chacune des bouteilles. Si les deux conducteurs communiquent séparément avec les branches d'un excitateur et que l'expérience soit dirigée de façon que la décharge se fasse d'une manière à peu près indifférente soit par l'excitateur, soit par les six bouteilles de la batterie en cascade, la résistance au passage de l'étincelle est la même de part et d'autre; on sait alors que la décharge directe dans l'air à une distance déterminée par l'expérience correspond à une différence de potentiel six fois plus grande que celle qui produit la décharge à une distance plus petite entre les boules de chaque bouteille. La loi des distances explosives dans ce dernier cas étant déterminée directement, on en déduira la loi relative aux étincelles beaucoup plus longues.

J'ai constaté ainsi, comme on l'avait fait déjà, que depuis 1^{mm} jusqu'à 10^{mm} la distance à laquelle se produit une étincelle électrique entre deux boules est à peu près proportionnelle à la différence des potentiels; au delà de cette dernière limite, et jusqu'à 150^{mm}, la distance explosive croît beaucoup plus rapidement que la différence des potentiels. Cette circonstance est importante à signaler: ainsi l'on commettrait une grave erreur en considérant la puissance d'une machine électrique comme proportionnelle à la longueur des étincelles qu'on en peut tirer; d'autre part, malgré la distance prodigieuse à laquelle se produisent les éclairs, même sans tenir compte des corps intermédiaires qui facilitent le passage de la décharge, on ne peut pas en conclure que le potentiel d'un nuage électrisé soit hors de proportion avec ceux que l'on réalise au moyen des machines électriques.

Mesure des potentiels élevés en valeurs absolues.(*Traité d'Électricité*, t. I, p. 409, et t. II, p. 90).

Comme les électromètres statiques exigent toujours un certain temps pour arriver à l'équilibre, la détermination du potentiel d'un conducteur qui donne de temps en temps des étincelles devient très-difficile, parce que l'appareil des mesures éprouve des soubresauts continuels.

Pour éviter cette difficulté, j'ai employé une disposition qu'on peut appeler un *trop-plein électrique*. L'un des pôles d'une machine de Holtz, par exemple, communiquant avec le sol, l'autre pôle est mis en communication avec une pointe placée en face d'un conducteur non isolé et, d'autre part, avec une sphère qui agit sur une aiguille conductrice non isolée, terminée par des boules et suspendue à un fil de métal qui communique avec le sol. Quand la machine fonctionne, le pôle isolé s'électrise; mais, dès que la charge atteint une certaine valeur, la pointe laisse échapper des aigrettes continues qui maintiennent le potentiel sensiblement constant. Si même l'électricité afflue parfois d'une manière trop rapide et provoque une étincelle entre la pointe et le conducteur, la chute de potentiel ne dure qu'un instant très-court, et la régularité des oscillations de l'aiguille n'en est pas sensiblement troublée. En choisissant d'une manière convenable les dimensions de la sphère influente et de l'aiguille, ainsi que la distance qui les sépare, on peut évaluer en grammes l'action qui s'exerce entre elles en déterminant la durée des oscillations de l'aiguille et son moment d'inertie; on en déduit la valeur absolue du potentiel de la sphère.

Cela fait, on cherche, par comparaison directe, la distance explosive entre deux boules qui correspond à la même différence de potentiel que la production des aigrettes par la pointe qui servait de *trop-plein*, et l'on a tous les éléments nécessaires pour déterminer en valeur absolue la différence de potentiel qui correspond à une étincelle de longueur déterminée entre deux boules de dimensions données.

Les nombres auxquels je suis ainsi parvenu pour une étincelle de 1^{mm}, par exemple, entre des boules de 0^m,03 de diamètre, sont une fois et demie aussi grands que ceux qui ont été donnés par M. Thomson pour la production d'une étincelle entre deux plateaux, ce qui est parfaitement d'accord avec l'influence connue de la forme des conducteurs.

Comparaison des machines électriques.

(*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXXI, p. 1011 ; 1875. — *Traité d'Électricité*, t. II, p. 316 et suiv.)

Le jeu d'une machine électrique quelconque a pour effet de charger d'électricités contraires deux conducteurs différents, qui peuvent être isolés tous deux, et que l'on peut mettre, l'un ou l'autre, en communication avec le sol. La différence maximum des potentiels que la machine permet d'établir sur les conducteurs dépend uniquement de ses dimensions, à condition toutefois que les fuites d'électricité le long des supports isolants et celles qui se produisent sous la forme d'aigrettes restent inférieures au débit de l'appareil. En réalité, la distance des peignes dans une machine à frottement, ou la distance des deux conducteurs dans une machine double, suffit pour indiquer une limite supérieure de la différence de potentiel qu'elles comportent ; mais on peut ajouter que cette limite est rarement atteinte.

Le débit d'électricité est mieux défini. J'ai constaté que dans une machine quelconque, tant que la distance explosive reste faible, le débit d'électricité est proportionnel à la vitesse de rotation, et même, pour différentes machines comparées entre elles, qu'il est proportionnel à l'étendue des surfaces de verre qui passent en face des peignes pendant l'unité de temps. Il y a cependant quelques différences qui tiennent à la nature du verre. Le débit diminue quand on augmente la distance explosive, mais d'une manière très-inégale, rapidement pour certaines machines et beaucoup plus lentement pour d'autres, telles que la machine de Holtz.

Pour comparer le rendement utile de ces différents appareils, il faut tenir compte de la vitesse de rotation que chacun d'eux comporte ; on trouve ainsi, ce qu'il était aisé de prévoir, que les machines nouvelles à réaction fournissent beaucoup plus d'électricité que les anciennes machines à frottement, et avec un travail notablement moindre.

J'ai évalué de cette manière le débit des différentes machines que j'ai eues à ma disposition et, à l'aide des expériences précédentes sur la détermination des potentiels en valeurs absolues, j'ai pu donner aussi, en nombres absolus, le débit d'électricité des machines. Les renseignements laissés par Van Marum, sur les effets de fusion qu'il obtenait avec une batterie chargée par sa machine, m'ont même permis de comparer le rendement des appareils actuels avec celui de la machine célèbre dont se servait Van Marum et qui a été malheureusement détruite. Il fallait pour cela connaître la capacité de

la batterie de Van Marum; M. Van der Willigen a eu l'obligeance de me confier deux des bouteilles qui en faisaient partie.

Enfin j'ai étudié, au même point de vue, l'électricité fournie par les bobines d'induction. Lorsqu'on ne demande à ces appareils que de courtes étincelles, le débit d'électricité à chacune des décharges est très-grand et ces décharges peuvent, sans inconvénient, se succéder à de courts intervalles. Quand l'étincelle devient plus longue, le débit relatif à chacune d'elles diminue rapidement et l'on est obligé de les écarter davantage. Si l'on tient compte de ces deux circonstances, on peut comparer, par exemple, une bobine d'induction avec une machine de Holtz. On trouve ainsi que le rapport des débits est tout à l'avantage de la bobine, tant que les étincelles sont courtes, mais que les deux appareils peuvent devenir équivalents pour une distance plus grande et même qu'en augmentant les longueurs des étincelles, la machine de Holtz ne tarde pas à devenir supérieure à la bobine.

Je n'insisterai pas plus longuement sur d'autres points, traités par l'expérience ou la théorie dans mon Ouvrage, tels que la réfraction de l'étincelle électrique, l'emploi de la fusion des fils pour la comparaison des décharges, la distribution des potentiels dans une pile ouverte, etc.

Sur la théorie des électromètres.

(Journal de Physique théorique et appliquée, t. VI, p. 169; 1877).

Sir William Thomson a imaginé plusieurs électromètres à graduation systématique, qui permettent d'évaluer les potentiels, soit en valeurs absolues, soit en valeurs relatives. Le plus commode dans la pratique est l'électromètre à quadrants, dont l'usage tend à devenir général. La théorie de cet instrument peut être établie d'après les théorèmes suivants :

1° Quand un système de conducteurs électrisés est isolé, le travail accompli par les forces électriques pour une déformation quelconque du système est égal à la diminution de l'énergie électrique totale. Cette énergie tend donc vers un *minimum* si les conducteurs électrisés sont abandonnés à leurs actions réciproques.

2° Quand un système de conducteurs, maintenus à des potentiels constants, éprouve une déformation quelconque, le travail extérieur est égal à l'accroissement de l'énergie totale. Dans ce cas, l'énergie électrique tend vers un *maximum*.

Le premier théorème est évident. J'ai montré que le second peut s'en déduire d'une manière très-simple par des considérations élémentaires. Si l'on applique ensuite ce théorème, comme l'avait fait déjà M. Maxwell, à la théorie des électromètres, on démontre que, si ces instruments remplissent certaines conditions de construction, l'aiguille portée au potentiel V étant située entre deux conducteurs respectivement aux potentiels V_1 et V_2 , la déviation est proportionnelle au produit

$$(V_1 - V_2) [V - \frac{1}{2}(V_1 + V_2)],$$

le coefficient de proportionnalité pouvant être, dans certains cas, déterminé en valeur absolue.

Il suffit d'ailleurs que la condition de symétrie des deux conducteurs et de l'aiguille soit réalisée pour que l'action soit proportionnelle au produit

$$(V_1 - V_2) [V - \alpha (V_1 + V_2)].$$

Le coefficient α n'est égal à $\frac{1}{2}$ que dans des cas très-particuliers; mais, si les conducteurs fixes sont à des potentiels égaux et de signes contraires, ce coefficient disparaît de la formule, et la force électrique est simplement proportionnelle à l'expression

$$(V_1 - V_2) V.$$

Électricité dynamique.

Sur un régulateur de courants électriques.

(*Journal de Physique théorique et appliquée*, t. II, p. 294; 1873).

L'emploi des piles à deux liquides permet d'obtenir des courants dont la constance est suffisante dans la plupart des cas; mais il peut être utile, pour certaines recherches scientifiques et même quelques applications industrielles, d'avoir à sa disposition un courant d'une intensité absolument invariable, malgré les résistances et les forces électromotrices que l'on pourra introduire dans le circuit. Ce problème a été plusieurs fois résolu d'une manière plus ou moins satisfaisante; j'ai employé avec succès une disposition mécanique dont la pièce principale est le rouage différentiel usité par M. Redier pour la construction de son baromètre inscripteur.

Le courant passe dans une bobine qui attire un aimant, comme dans la balance électromagnétique de M. Becquerel. Le fléau est équilibré par un contre-poids qui le maintient horizontal lorsque l'attraction exercée sur l'aimant a une valeur déterminée, et il s'incline dans un sens ou dans l'autre quand l'action du courant augmente ou diminue. Ce fléau porte un T, placé entre les deux volants du rouage différentiel, qui peut laisser échapper l'un ou l'autre des mouvements ou les arrêter tous les deux. La roue satellite entraîne un chariot qui augmente ou diminue l'intensité du courant en introduisant dans le circuit ou en supprimant des résistances accessoires formées par des colonnes liquides ou des fils métalliques, et l'appareil s'arrête seulement lorsque le T du fléau se trouve au milieu des deux volants, c'est-à-dire quand l'action de la bobine sur l'aimant a repris sa valeur primitive. On peut aisément avec cet appareil régler à $\frac{1}{100}$ près l'intensité d'un courant, quelles que soient les variations de la pile, pourvu qu'elles restent comprises entre certaines limites bien entendu.

Je fais remarquer à ce sujet que la balance électromagnétique de M. Becquerel donne lieu à un équilibre stable, même par attraction, si l'on a soin de régler d'une manière convenable la position de l'aimant ou du fer doux par rapport à la bobine.

Des machines magnéto-électriques.

(*Journal de Physique théorique et appliquée*, t. VI, p. 203 et 297; 1877.)

La construction des moteurs électriques et des électromoteurs mécaniques a fait de grands progrès dans ces dernières années. Ces appareils ingénieux ont appelé l'attention des physiciens, et paraissent destinés à jouer un rôle important dans l'industrie; j'ai cru utile d'en donner la théorie, au moins dans ses traits essentiels, en partant des phénomènes connus de l'induction et du principe de la conservation de l'énergie, dont M. Helmholtz a montré la fécondité dans un Mémoire resté célèbre.

La force électromotrice d'induction dans une pareille machine est indépendante des causes qui entretiennent le mouvement, que cette machine soit mue par une force étrangère ou par un courant électrique. Il en résulte que le travail accompli, quand on l'emploie comme moteur, est d'autant plus grand, toutes choses égales d'ailleurs, que la machine fournit un courant plus intense lorsqu'elle sert d'électromoteur. Cette réciprocité, qui est rigoureuse en théorie, exige cependant dans la pratique, surtout quand il s'agit d'ap-

pareils à électro-aimants, une continuité dans les commutateurs qui n'est pas toujours réalisée.

J'ai indiqué ensuite les applications de cette théorie aux principaux types, dans lesquels sont compris tous les systèmes de construction que l'on peut adopter : 1° les machines *électrodynamiques*, sans aimants ni fer doux ; 2° les machines *magnétiques*, ne renfermant que des aimants permanents ; 3° les machines *magnéto-électriques*, formées d'électro-aimants fixes et d'électro-aimants mobiles ; 4° enfin les machines *mixtes*, qui comprennent des aimants et des électro-aimants.

Ces divers types diffèrent entre eux par la loi suivant laquelle varie la force électromotrice d'induction, et toutes les propriétés de chaque machine peuvent se déduire de cette loi. Le problème, dans toute sa généralité, est très-complexe, parce qu'il faudrait connaître la loi d'aimantation du fer employé, le retard à l'aimantation et la réaction qui s'exerce sur les aimants permanents ; on peut cependant, dans les différents cas, indiquer la forme que doit prendre l'expression mathématique de cette loi.

Je citerai, en particulier, le cas des machines mixtes. Quand on tient compte des réactions qui se produisent sur les aimants, on trouve que l'intensité du courant, l'appareil étant employé comme électromoteur, est proportionnelle à la vitesse de rotation et en raison inverse de la résistance totale augmentée d'une résistance fictive elle-même proportionnelle à la vitesse. M. Jamin avait trouvé par expérience, avec une machine de l'Alliance marchant à vitesse à peu près constante, que la loi d'Ohm est applicable si l'on remplace la résistance réelle des bobines par une résistance plus grande ; ce terme additionnel est la résistance fictive déduite par la théorie des réactions que subissent les aimants.

Un autre Mémoire, non encore paru, donne les résultats d'expériences nombreuses que nous avons faites, en commun avec M. Angot, sur plusieurs machines de différents modèles, des moteurs Froment, des machines Gramme à aimants et à électro-aimants, en considérant ces appareils tantôt comme moteurs, tantôt comme producteurs d'électricité. Tous les résultats sont conformes aux prévisions de la théorie.

Électricité atmosphérique.

Sur l'état électrique de l'air.

Depuis quelques années j'ai fait, à différentes reprises, des observations sur l'état électrique de l'air et étudié plusieurs phénomènes qui s'y ratta-

chent. Pendant les mois d'août et de septembre 1876, nous avons installé, avec M. Joubert, deux appareils d'observation à Erquy (Côtes-du-Nord). L'un des appareils était sur la plage; l'autre était situé près d'un sémaphore, à la distance de 1200^m environ et à une altitude de 80^m, de manière à pouvoir comparer les phénomènes électriques en deux points peu éloignés, mais dans des conditions topographiques très-différentes. Nous avons constaté d'abord qu'à la station supérieure le potentiel de l'air est généralement, pour une même distance à la surface du sol, plus élevé qu'à la station inférieure; en suivant ces observations sur plusieurs points de la côte avec un électromètre portatif, nous avons vérifié que le potentiel à la même hauteur varie avec la configuration du sol, comme on peut le prévoir d'après la forme des courbes de niveau électriques; il est plus élevé qu'au-dessus de la plaine, quand on observe sur le sommet d'un monticule, sur le bord d'un plateau; il est plus faible, au contraire, dans le creux d'un vallon, dans le voisinage des arbres et des constructions.

Malgré la faible distance des deux stations, quand on suivait pendant quelque temps les indications simultanées des deux instruments, même par les temps les plus calmes et le ciel le plus pur, il n'arrivait presque jamais que les courbes qui traduisaient les variations de l'état électrique eussent les mêmes allures; il en résulte donc que, si le potentiel de l'air en un point est dû, en grande partie, à des masses électriques très-éloignées, leur influence est troublée par des couches d'air électrisé tout à fait localisées dans l'atmosphère.

Après de chaque électromètre se trouvaient deux mâts, terminés par une mèche allumée, l'un de 5^m et l'autre de 10^m de hauteur, que l'on mettait alternativement en communication avec l'électromètre. Dans ce cas, les courbes des variations relatives aux deux mâts se suivaient très-exactement et les indications à chaque instant étaient sensiblement dans le rapport de 1 à 2. Le potentiel de l'air en un point varie donc à peu près proportionnellement à sa distance à la surface du sol. Ce résultat est encore prévu, autant du moins que les deux hauteurs que l'on compare ne cessent pas d'être très-petites par rapport à la distance des couches d'air perturbatrices.

Quant au signe de l'électricité, il est presque toujours positif lorsque le ciel est pur; nous avons cependant observé plusieurs fois de l'électricité négative, tantôt sans cause apparente et tantôt à cause de l'existence d'orages éloignés dont on apercevait les lueurs à l'horizon. Lorsque le ciel est nuageux, l'électricité est aussi le plus souvent positive, mais ses variations sont beaucoup plus rapides et, si le ciel est partiellement couvert,

l'approche d'un nuage électrisé se manifeste aux appareils à partir d'une très-grande distance. En prenant des précautions particulières pour l'isolement des conducteurs, on peut continuer les observations même pendant la pluie; nous avons constaté ainsi que la pluie est très-souvent négative. Il nous est arrivé fréquemment de tirer des étincelles de plusieurs centimètres de la partie inférieure des conducteurs en temps ordinaire, et même des étincelles de plusieurs millimètres par la pluie battante, sans qu'il y eût aucune apparence d'un orage véritable.

La plupart de ces observations confirment ce que l'on savait déjà sur l'électricité atmosphérique, en particulier celles de sir William Thomson à Glasgow et dans l'île d'Arran.

Grâce au concours de l'Administration des télégraphes, nous avons pu établir entre les deux stations un fil télégraphique communiquant aux deux extrémités avec le sol par de grandes sondes de fer. Un galvanomètre placé sur le fil indiqua un courant permanent, d'intensité variable, allant du sémaphore à la grève. Ce courant ne pouvait pas être attribué à la différence des actions chimiques aux deux sondes, parce que la force électromotrice atteignait 5 ou 6 couples Daniell, et que nous pouvions opérer d'une manière continue la décomposition de l'eau. Le potentiel du sol au sémaphore était donc toujours plus élevé que sur la grève. On peut expliquer cette circonstance en remarquant que le sémaphore est placé sur un rocher de grès très-mauvais conducteur, et que ce rocher, soumis à une influence électrique plus énergique de la part de l'atmosphère, peut garder continuellement, mais à des degrés variables, un potentiel plus élevé que la surface générale de la Terre. Je n'indique cette circonstance que pour montrer, par un exemple, l'intérêt que présentent les observations sur l'électricité atmosphérique.

Pendant les mois d'août et de septembre 1877, j'ai installé de même un appareil à indications continues sur le bord de la mer, à Dunkerque, et constaté, en particulier, une circonstance qui ne me paraît pas avoir été encore signalée. Quand un orage se prépare, le potentiel de l'air est généralement très-élevé, tantôt positif, tantôt négatif; il éprouve, à des intervalles rapprochés, des variations considérables et des changements de signe. Dès que l'orage se déclare et se rapproche de l'observateur, le potentiel de l'air baisse rapidement et reste très-faible pendant presque toute la durée du phénomène. N'est-il pas naturel d'admettre qu'il existe une relation entre les variations de l'état électrique de l'air et les impressions physiologiques qu'éprouve l'homme et même les animaux par les temps orageux?

Sur un appareil inscripteur de l'électricité atmosphérique.

L'état électrique de l'air est l'élément météorologique qui éprouve les variations les plus rapides et les plus irrégulières; l'inscription continue des phénomènes est alors absolument nécessaire, parce qu'il est impossible de déduire des conséquences certaines d'observations discontinues, échelonnées d'une manière quelconque dans le cours de la journée. Sir W. Thomson a imaginé un électromètre dont les indications sont traduites par la photographie, et cet instrument est employé dans plusieurs observatoires de Météorologie, particulièrement en Angleterre. L'emploi de la photographie exige une manipulation spéciale et une installation à l'abri de la lumière, ce qui présente parfois des inconvénients. Avec le concours de M. Redier, j'ai fait construire un appareil dans lequel les déviations de l'aiguille d'un électromètre sont transmises, par des moyens mécaniques, à un crayon qui les écrit sur une bande de papier. Ce problème présentait des difficultés, parce que la force qui dévie l'aiguille est extrêmement faible et incapable de régler le mouvement d'un rouage d'horlogerie. Une sorte de mâchoire commandée par une horloge se ferme à des intervalles très-rapprochés pour arrêter l'aiguille dans la position qu'elle occupe; alors les volants du rouage différentiel sont rendus libres et l'un d'eux fait tourner l'électromètre d'un angle égal à la déviation de l'aiguille. Une disposition facile à imaginer permet ensuite de transmettre au crayon la rotation de l'électromètre.

On peut employer la même disposition pour inscrire mécaniquement les indications des instruments les plus délicats, pour lesquels on était obligé d'avoir recours à la photographie, telles que les déviations d'un galvanomètre, les variations de la déclinaison ou de l'inclinaison magnétique, les variations des composantes horizontale et verticale, etc.

Influence de l'ozone sur la formation des brouillards.

Quand l'air saturé d'humidité subit brusquement une petite diminution de pression, le refroidissement dû à la détente provoque la condensation de l'eau sous forme de brouillard. Il suffit, pour s'en assurer, de mettre une poire de caoutchouc en communication avec l'atmosphère d'un flacon fermé qui renferme de l'eau; en comprimant et en décompressant la poire avec la main, on provoque la formation d'un nuage. M. Coulier a constaté que

l'expérience ne réussit qu'à la condition que l'air renferme des poussières en suspension. Si l'on a laissé reposer le flacon pendant assez longtemps ou si l'on a soin d'y introduire de l'air privé de poussières, en le filtrant par une bourre de coton, on n'obtient de brouillard que pour des changements de pression beaucoup plus grands. Il semble résulter de là qu'une masse d'air confinée n'est jamais absolument saturée de vapeur d'eau, surtout lorsqu'elle tient en suspension des corps de dimensions très-petites. Quelle que soit l'explication de ce phénomène, j'ai reconnu que l'ozone produit le même effet que les poussières et facilite la formation des brouillards. Si l'on introduit dans le flacon qui sert à l'expérience précédente de l'ozone filtré par du coton, ou même simplement si l'on provoque des étincelles électriques autour du ballon, on voit immédiatement apparaître les brouillards au moment où la poire de caoutchouc est décomprimée. La petite quantité d'ozone produite dans le flacon sous l'influence des étincelles extérieures, dans le dernier cas, suffit pour rendre l'effet manifeste. En ouvrant le flacon, on reconnaît d'ailleurs l'odeur de l'ozone.

Comme l'existence de l'ozone dans l'air n'est pas douteuse et que l'origine électrique de ce corps curieux est au moins très-probable, l'expérience que je viens de citer me paraît avoir une relation directe avec l'électricité atmosphérique.

Influence de l'électricité sur l'évaporation.

(Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. LXXXVI, p. 575 ; 1878.)

Ces expériences sont en cours d'exécution depuis deux ans. Depuis que Franklin et Lemonnier ont démontré l'existence de l'électricité dans l'air, soit par les temps orageux, soit dans les conditions ordinaires, plusieurs physiciens ont cherché quelle pouvait être l'origine de l'électricité atmosphérique. Les expériences de Volta et celles de Pouillet, en particulier, semblaient avoir établi que l'évaporation de l'eau ordinaire dégage de l'électricité positive et est sans doute la source la plus importante de l'électricité atmosphérique. Des travaux plus récents ont montré que cette conséquence est au moins très-douteuse et que, dans tous les cas d'ébullition tumultueuse où l'évaporation paraissait avoir été une cause d'électricité, il y avait toujours projection de matières solides ou liquides sur les parois du vase, et que ces frottements jouaient le rôle le plus important dans l'électrisation.

Comme la quantité d'électricité produite par une évaporation lente est nécessairement très-faible et doit disparaître à cause de l'insuffisance des isoléments, j'ai abordé le problème d'un point de vue différent en cherchant si l'évaporation est modifiée sous l'influence des corps électrisés. Pour cela j'ai disposé, au-dessous de conducteurs électrisés, une série de petits bassins d'évaporation communiquant avec le sol et contenant soit de l'eau ordinaire, soit de la terre mouillée. L'électrisation était obtenue par une machine de Holtz, mise en mouvement d'une manière continue par un moteur à eau et placée sous une cage dont l'air était desséché par de l'acide sulfurique, ce qui permet de faire fonctionner la machine par tous les temps; à l'aide d'une sorte de trop-plein électrique dont j'ai parlé plus haut, l'état électrique des conducteurs était maintenu constant jour et nuit.

Les conducteurs étaient d'abord des plateaux placés au-dessus des bassins d'évaporation, mais j'ai reconnu que cette disposition nuit à la dispersion des vapeurs. Il suffit de substituer aux plateaux des grilles conductrices formées par des cercles de fils métalliques réunis entre eux; dans ce cas, l'influence électrique est exactement la même, et les mouvements de l'air se font sans obstacle. Les bassins d'évaporation étaient disposés en deux séries aussi identiques que possible, avec les mêmes grilles conductrices, et les expériences étaient alternatives, l'un des deux systèmes de conducteurs étant réuni avec le sol et l'autre avec la machine, et l'on déterminait tous les jours la quantité d'eau évaporée dans chacun des bassins. J'ai reconnu ainsi que l'évaporation est constamment exagérée sous les conducteurs électrisés, quel que soit le signe de l'électricité; cet effet est tellement manifeste que l'évaporation était quelquefois doublée dans les bassins soumis à l'influence électrique.

Ces expériences présentent des difficultés que je n'avais pas prévues. Si les bassins d'évaporation sont dans une enceinte où la température varie d'une manière notable, les moindres inégalités de température ou les différences d'exposition suffisent pour voiler complètement le rôle de l'électricité. Je n'ai pu obtenir de résultats bien concordants qu'en enfermant les bassins dans une grande boîte et en opérant l'hiver, dans une sorte de sous-sol, où la température, pendant près d'un mois, a oscillé entre 4° et 6°.

Je ne puis rien affirmer encore sur la différence qui se manifeste entre les actions des deux électricités: il faudrait, pour cela, que les expériences alternatives fussent faites en maintenant les conducteurs à des potentiels exactement égaux et de signes contraires, et en évitant toute variation de température. J'espère que la construction d'une étuve à température

constante me permettra d'éclaircir ce point et d'étudier quelques autres questions se rattachant à l'action de l'électricité statique sur la végétation des plantes et sur les animaux.

De toute façon, que l'excès de l'évaporation soit dû à une action spécifique de l'électricité ou à des actions mécaniques secondaires, c'est un phénomène dont il faut tenir compte, si l'on veut apprécier le rôle de l'électricité atmosphérique dans la nature, sur la formation des vapeurs par les eaux, par le sol et par les végétaux.